Environnement Canada
Environment Canada

Caractéristiques des nutriants de la rivière Souris près de Coulter (Manitoba) durant les années sèches

V.T. Chacko

ÉTUDE Nº 154, SÉRIE SCIENTIFIQUE

DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES ET DES TERRES
RÉGION DE L'OUEST ET DU NORD
DIRECTION DE LA QUALITÉ DES EAUX
REGINA (SASKATCHEWAN) 1987

(Available in English on request)

Publié avec l'autorisation
du ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

N° de cat. En 36-502/154F

ISBN 0-662-94186-1

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	v
INTRODUCTION	1
Historique et objectifs	1
Zone étudiée	1
MÉTHODOLOGIE	3
Méthodes sur le terrain	3
Échantillons uniques prélevés à intervalles réguliers	3
Échantillons multiples prélevés en vue de l'étude spéciale	3
Méthodes au laboratoire	3
Échantillons uniques prélevés à intervalles réguliers	3
Échantillons multiples prélevés en vue de l'étude spéciale	4
Comparabilité des données d'analyse des échantillons uniques et des échantillons multiples	4
Données sur les débits	4
RÉSULTATS	4
Échantillons multiples provenant de la section transversale de la rivière	4
Données chronologiques pour d'autres années sèches	6
Formes d'azote et de phosphore	9
DISCUSSION	9
Échantillon unique et homogénéité de la section transversale	9
Concentration des nutriants au cours de la période étudiée et durant d'autres années sèches	11
Formes et rapports des nutriants	11
Azote organique total dissous	11
Azote ammoniacal (total)	12
Azote des nitrates	12
Azote des nitrites	12
Azote particulaire	12
Phosphore des orthophosphates	12
Phosphore organique total dissous	13
Phosphore particulaire	13
Rapports phosphore/azote	13
CONCLUSIONS	14
RECOMMANDATIONS	14
REMERCIEMENTS	14
RÉFÉRENCES	15
ANNEXE A	16

Tableaux

Page

1. Précision des échantillons multiples comparativement à la précision analytique 6
2. Données statistiques sommaires sur les nutriants pendant les diverses périodes de débit 7
3. Concentrations moyennes des formes d'azote et de phosphore pendant la période visée par l'étude 8
4. Mesures effectuées sur place lors du prélèvement des échantillons multiples 9
5. Concentrations et rapports atomiques du N inorganique et du P des orthophosphates; concentrations et rapports atomiques du P particulaire et du N particulaire 13

Illustrations

Figure 1. Bassin de la rivière Souris et section étudiée 2

Figure 2. Zones d'échantillonnage 3

Figure 3. Variation des échantillons multiples par rapport à la variation pour la période visée par l'étude 5

Figure 4. Débit moyen des journées d'échantillonnage et concentration moyenne des nutriants pendant les années sèches et pendant la période visée par l'étude, durant les diverses périodes de débit 10

Résumé

La rivière Souris, un petit cours d'eau de prairie près de Coulter au Manitoba, a fait l'objet d'une étude en 1979-1980 en vue de déterminer les concentrations des diverses formes d'azote et de phosphore dans une coupe transversale. On a établi une comparaison entre les données de cette étude et celles obtenues au cours d'autres périodes de sécheresse.

Les résultats ont montré que l'échantillonnage multiple était plus important pour les formes d'azote que pour celles de phosphore, et que la variation des concentrations dans la coupe transversale était minime par rapport à la variation mensuelle.

On a trouvé que les données de 1979-1980 correspondaient assez bien à celles qui avaient été recueillies pendant les autres périodes de sécheresse. De plus, on a constaté que la sécheresse entraînait la réduction de la concentration la plus basse de N sous forme de nitrate et de P particulaire.

On a identifié la présence d'azote surtout sous forme de N organique total dissous, de N ammoniacal et de N particulaire. De même le phosphore était présent surtout sous la forme d'orthophosphate, de P particulaire et de P organique total dissous.

La libération périodique de l'eau du réservoir J. Clark Salyer a eu de toute évidence un effet important sur la concentration des éléments nutritifs. Les données ont aussi révélé que la rivière Souris était un cours d'eau limité en azote inorganique plutôt qu'en orthophosphates.

Abstract

A small prairie stream, the Souris River at Coulter, Manitoba, was studied in 1979/80 to determine the nitrogen and phosphorus species concentrations at a cross section of the river, and the study period data were evaluated in relation to other dry periods.

The study revealed that multiple sampling was more important for nitrogen species than for phosphorus species. It also showed that the cross-sectional variations of these species were minimal in relation to the month-to-month variations.

The 1979/80 data were found to be a fair representation of the other dry periods considered, and it was noted that the effect of the drought was most evident in the lower nitrate-N and particulate-P concentrations.

The major nitrogen species identified were total dissolved organic-N, ammonia-N, and particulate-N; the major phosphorus species were ortho-P, particulate-P, and total dissolved organic-P.

Periodic water releases from the J. Clark Salyer Reservoir proved to be an important factor affecting the nutrient species concentration. The data also revealed that the Souris River was an inorganic-N-limited stream rather than an ortho-P-limited one.

Caractéristiques des nutriants de la rivière Souris près de Coulter (Manitoba) durant les années sèches

V.T. Chacko

INTRODUCTION

Historique et objectifs

Le projet de la dérivation Garrison est un plan à facettes d'aménagement des eaux qui, s'il est mis à exécution dans sa totalité, aura pour effet de dériver une partie des eaux de la rivière Missouri dans la rivière Souris et dans le bassin versant de la rivière Rouge (International Garrison Diversion Study Board, 1976a). La réalisation de ce projet conformément au plan original pourrait nuire à la qualité de l'eau au Canada et, entre autres, être la cause d'un apport additionnel d'eau riche en nutriants dans la rivière Souris, où ces nutriants se trouvent déjà en abondance (United States Environmental Protection Agency, 1971), et éventuellement dans le bassin sud du lac Winnipeg, où l'on signale que l'eutrophisation est déjà presque complète (Brunskill, 1974).

La rivière Souris est une source d'approvisionnement en eau potable, et elle sert à des fins d'irrigation ainsi que pour l'abreuvage du bétail; des activités récréatives comme la pêche, la navigation de plaisance et la natation y sont aussi pratiquées. Ses eaux sont d'une qualite marginale, et même une faible augmentation de la quantité de contaminants peut les rendre impropres à certaines des utilisations qui viennent d'être mentionnées (United States Environmental Protection Agency, 1971).

Même si, à partir de 1973, des données mensuelles ont été obtenues au sujet de l'azote total, de l'azote des nitrates et des nitrites et du phosphore total, l'International Garrison Diversion Study Board (1976b) a conclu que la banque de données sur les nutriants (azote et phosphore) de la rivière Souris était pauvre et qu'une meilleure compréhension des formes assimilables était essentielle pour déterminer «la nature et l'étendue de la transformation complexe de l'azote dans les rivières Rouge et Souris». Dans son rapport, cet organisme a aussi signalé le manque de données sur la qualité de l'eau durant les périodes sèches et, en conséquence, la nécessité d'en faire l'évaluation pour ces périodes. La Manitoba Clean Environment Commission (1980) a émis la même opinion lorsqu'elle a fait remarquer qu'il n'existait pas suffisamment de données sur le phosphore pour établir des objectifs en matière de concentration de cet élément dans la rivière Souris. Il a donc été bien reconnu qu'il était nécessaire d'effectuer une analyse plus poussée de la qualité des nutriants de la rivière Souris, notamment en période sèche.

Une étude a été réalisée au cours de la période sèche s'étendant d'août 1979 à août 1980. Elle a fait appel à un plan d'échantillonnage multiple et porté sur la détermination des formes assimilables. Les résultats ainsi obtenus et les données recueillies régulièrement par la Direction de la qualité des eaux pendant d'autres années sèches (1973, 1977, 1978, 1980 et 1981) font l'objet du présent document, qui a pour but la réalisation de trois objectifs précis :

1. évaluer la représentativité d'un échantillon unique prélevé dans la section transversale de la rivière;
2. évaluer les données de 1979-1980 par rapport à celles d'autres périodes sèches;
3. déterminer la concentration des formes d'azote et de phosphore dans la rivière Souris ainsi que leur rapport.

Zone étudiée

La rivière Souris est un cours d'eau international qui prend sa source en Saskatchewan, passe par le Dakota Nord (aux États-Unis) et retourne en territoire canadien par l'extrémité sud-ouest du Manitoba (figure 1). Tout le bassin de la rivière (d'une superficie approximative de 60 000 km^2) se trouve dans les régions agricoles riches en nutriants de la Saskatchewan, du Dakota Nord et du Manitoba. Le ruissellement dû à des sources diffuses constitue une source importante d'apports d'azote et de phosphore dans la rivière. En dépit de l'épuration saisonnière des eaux par les marécages des terres humides, les refuges fauniques comme celui du réservoir J. Clark Salyer, qui se trouve près de la rivière, contribuent considérablement à l'apport de nutriants dans la rivière Souris (Manitoba Clean Environment Commission, 1980). Il en est de même pour les effluents des localités de Minot, de Velva et de Towner (United States Environmental Protection Agency, 1971).

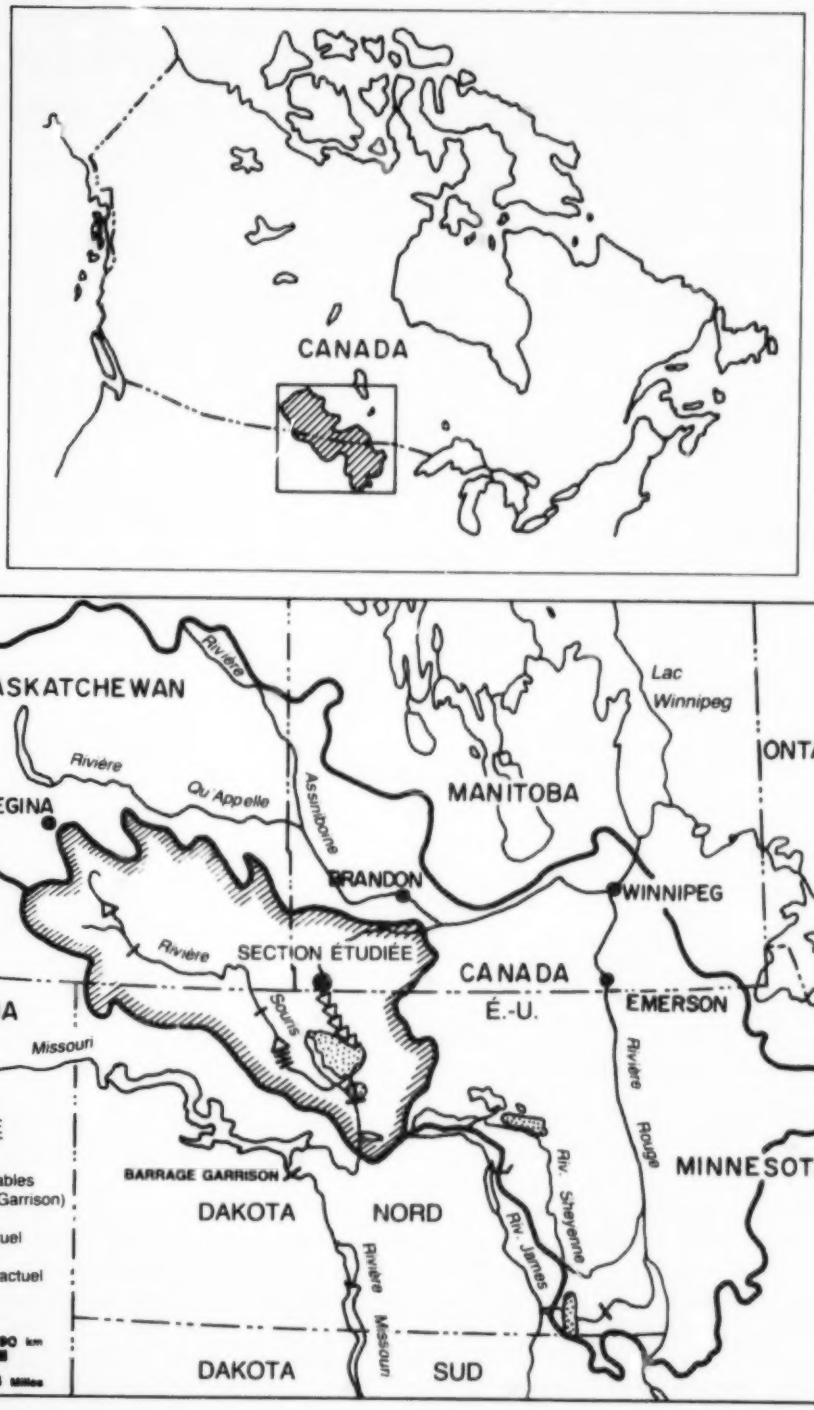

Figure 1. Bassin de la rivière Souris et section étudiée.

Le débit de la rivière Souris est extrêmement variable; la période de la fonte des neiges est de courte durée, et, le reste de l'année, le débit est très faible. En vertu d'une entente temporaire conclue en 1959 au sujet du partage des débits, le Dakota Nord doit maintenir un débit de 0.57 m^3/s là où la rivière pénètre au Manitoba, de juin à octobre inclusivement, sauf en période d'extrême sécheresse, auquel cas cet État doit maintenir un débit suffisant pour approvisionner en eau la population et le bétail ainsi que pour satisfaire aux besoins ménagers. Toutefois, cette entente ne s'applique pas à la période hivernale, alors que le débit est très faible et que la teneur de l'eau en oxygène est très faible.

MÉTHODOLOGIE

Méthodes sur le terrain

Échantillons uniques prélevés à intervalles réguliers

Les échantillons uniques prélevés à intervalles réguliers (tous les mois) pour l'analyse de l'azote total, de l'azote des nitrates et des nitrites et du phosphore total ont été prélevés près de la route 251 conformément aux méthodes normalisées d'échantillonnage de la Direction de la qualité des eaux décrites dans les guides (Environnement Canada, 1973; Direction de la qualité des eaux, 1979). D'autres échantillons ont été prélevés, à l'aide des mêmes méthodes, par le personnel de la Direction des ressources en eau ou dans le cadre du projet d'étude du bassin de la rivière Souris. Les échantillons ont été recueillis dans une bouteille de polyéthylène descendue au milieu du courant et remontée ensuite. Les valeurs ainsi obtenues indiquent la concentration à un moment donné à un endroit en particulier. Aucun agent de préservation n'a été ajouté aux échantillons, mais les bouteilles ont été expédiées dans des contenants où il y avait de la glace. En général, ces échantillons ont été analysés de trois à cinq jours après leur prélèvement.

Échantillons multiples prélevés en vue de l'étude spéciale

Les échantillons multiples ont été prélevés au cours de chacun des 14 voyages effectués entre août 1979 et août 1980. Une section transversale de la rivière Souris, près de la route 251, a été quadrillée en carrés de 1 m^2 ou moins pendant les périodes de faible débit (figure 2). Un échantillonneur en acrylique, fermé, a été descendu dans 12 carrés choisis au hasard, et un messager coulissant a été utilisé pour l'ouvrir. Les échantillons, prélevés successivement, ont été transvasés dans des bouteilles de polyéthylène qui ont été transportées à Winnipeg dans des contenants où il y avait de la glace. Aucun agent de préservation n'a été ajouté aux échantillons. L'analyse des substances dissoutes et la filtration des matières particulaires ont été effectuées dans les 24 heures suivant le prélèvement.

Méthodes au laboratoire

Échantillons uniques prélevés à intervalles réguliers

Ces échantillons ont été analysés au laboratoire de la Direction de la qualité des eaux conformément aux protocoles décrits dans le *Manuel des méthodes analytiques* (Environnement Canada, 1986). L'azote total est obtenu en faisant la somme de l'azote Kjeldahl et de l'azote des nitrates et des nitrites, ou bien la somme de l'azote total dissous et de l'azote particulaire. Ces deux méthodes sont jugées satisfaisantes pour la détermination de l'azote total. Quant aux concentrations de N inférieures à la limite de détection (seulement dans le cas de l'azote des nitrates et des nitrites), elles ont été interprétées comme étant égales à

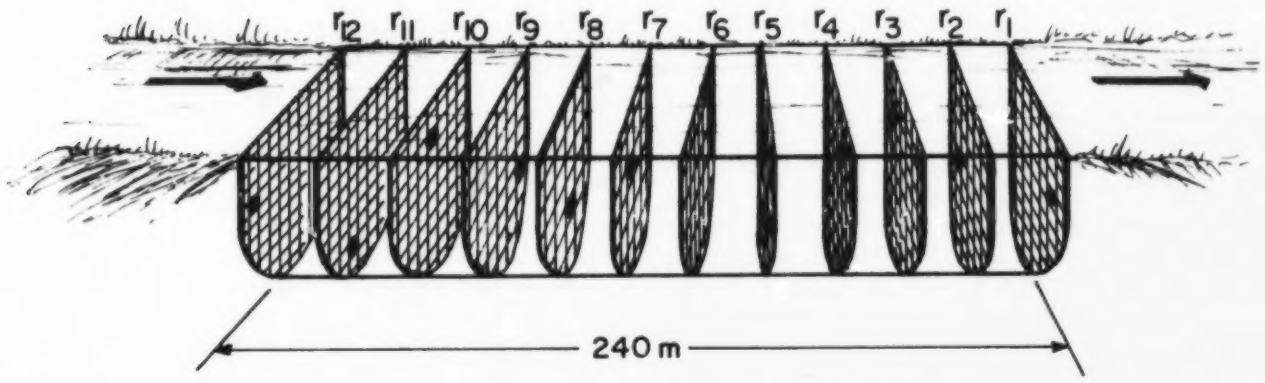

Figure 2. Zones d'échantillonnage.

la valeur numérique de cette limite. Le phosphore total a été analysé directement, et les concentrations ont toujours été supérieures à la limite de détection.

Échantillons multiples prélevés en vue de l'étude spéciale

Ces échantillons ont été analysés par le ministère des Pêches et des Océans à l'Institut des eaux douces de Winnipeg (Manitoba). Les formes assimilables suivantes ont été dosées : l'ammoniac (NH_3), les nitrates (NO_3), les nitrites (NO_2), l'azote total dissous (NTD), l'azote particulaire (NP), le phosphore des orthophosphates (oP), le phosphore total dissous (PTD) et le phosphore particulaire (PP). Les concentrations d'azote organique total dissous (NOTD), d'azote total (NT), de phosphore organique total dissous (POTD) et de phosphore total (PT) ont été calculées. Les méthodes d'analyse décrites par Stainton et coll. (1974) ont été employées.

Comparabilité des données d'analyse des échantillons uniques et des échantillons multiples

Comme il a été mentionné précédemment, les techniques d'échantillonnage, les intervalles de temps entre le prélèvement des échantillons et leur analyse et les méthodes analytiques n'étaient pas semblables. En dépit des différences entre les méthodes d'analyse, les données fournies par les deux laboratoires sont jugées exactes, et donc comparables, parce que ces laboratoires participaient à des programmes détaillés de contrôle interne de la qualité ainsi qu'à des programmes identiques de contrôle externe de la qualité. En ce qui concerne les techniques d'échantillonnage et les intervalles de temps, on suppose ce qui suit : la moyenne des échantillons multiples et l'échantillon unique intégré sont comparables, et la détérioration de l'échantillon unique (en ce qui concerne l'azote total, l'azote des nitrates et des nitrites et le phosphore total), en raison de l'intervalle de plus longue durée entre le prélèvement et l'analyse, est minimale.

Données sur les débits

Toutes les données sur les débits utilisées dans le présent document proviennent de la Direction des ressources en eau (Environnement Canada, 1981 et 1983). Ces données ont été obtenues à deux stations se trouvant à environ 20 km de distance l'une de l'autre : en amont, à Westhope (Dakota Nord), et en aval, à Coulter (Manitoba). À ce dernier endroit, qui est le point d'intérêt de la présente étude, la station a été établie en 1977. La comparaison des données de 1977 à 1980 (régression simple) a permis d'établir une corrélation (R^2) de 0.996, ce qui indique une bonne concordance entre les données obtenues à ces stations. Les données précédemment obtenues pour les débits à Coulter et qui sont ici présentées ont été corrigées en conséquence.

RÉSULTATS

Échantillons multiples provenant de la section transversale de la rivière

La vitesse moyenne d'écoulement des eaux pour les jours où les échantillons ont été prélevés a été estimée à 8 m/min. La période moyenne d'échantillonnage pour chaque série de 12 échantillons était de 30 min, ce qui correspond au volume d'eau compris dans le tronçon de la rivière de 240 m de long (figure 2) où les échantillons ont été prélevés en série. Ces échantillons sont donc des échantillons multiples de la section transversale de 240 m de la rivière Souris près de la route 251.

Pour déterminer la variation des 12 échantillons multiples, une valeur pour la précision a été calculée. Le tableau 1 montre la précision des échantillons et la précision analytique. Une faible valeur pour la précision des échantillons (calculée en utilisant le coefficient de variation) indique que de bonnes méthodes d'analyse et d'échantillonnage (prélèvement et préservation) ont été employées, que, pour toutes les bouteilles contenant les échantillons, il n'y a pas eu de changement ou que le taux de changement était le même, ou que la section transversale était homogène. Une valeur élevée laisse supposer qu'il s'est produit des variations dans l'analyse et l'échantillonnage, que le taux de changement n'était pas le même pour toutes les bouteilles ou que la section transversale n'était pas homogène, ou encore que ces trois facteurs ont joué. Dans l'ensemble, la variation analytique a été faible par comparaison aux variations des échantillons multiples, sauf dans le cas des nitrites, où plusieurs variations moins élevées ont été observées. La raison en est que la plupart des concentrations de nitrites étaient inférieures à la limite de détection, ce qui a donné des valeurs identiques et, par conséquent, de moindres variations. La variation la plus élevée a été constatée dans le cas des nitrates. On ne sait pas dans quelle mesure la variabilité élevée prévue près de la limite de détection analytique a influé sur la variation de l'azote des nitrates.

La figure 3 montre aussi la variation des échantillons multiples exprimée sous la forme de courbes de distribution des «t», de Student, à un niveau de confiance de 95 %. Les variations sont données en fonction des concentrations moyennes mensuelles. Même si la variation était faible durant l'hiver dans le cas de certaines formes comme l'azote ammoniacal, l'azote des nitrites et le phosphore des orthophosphates, elle était très différente durant la période

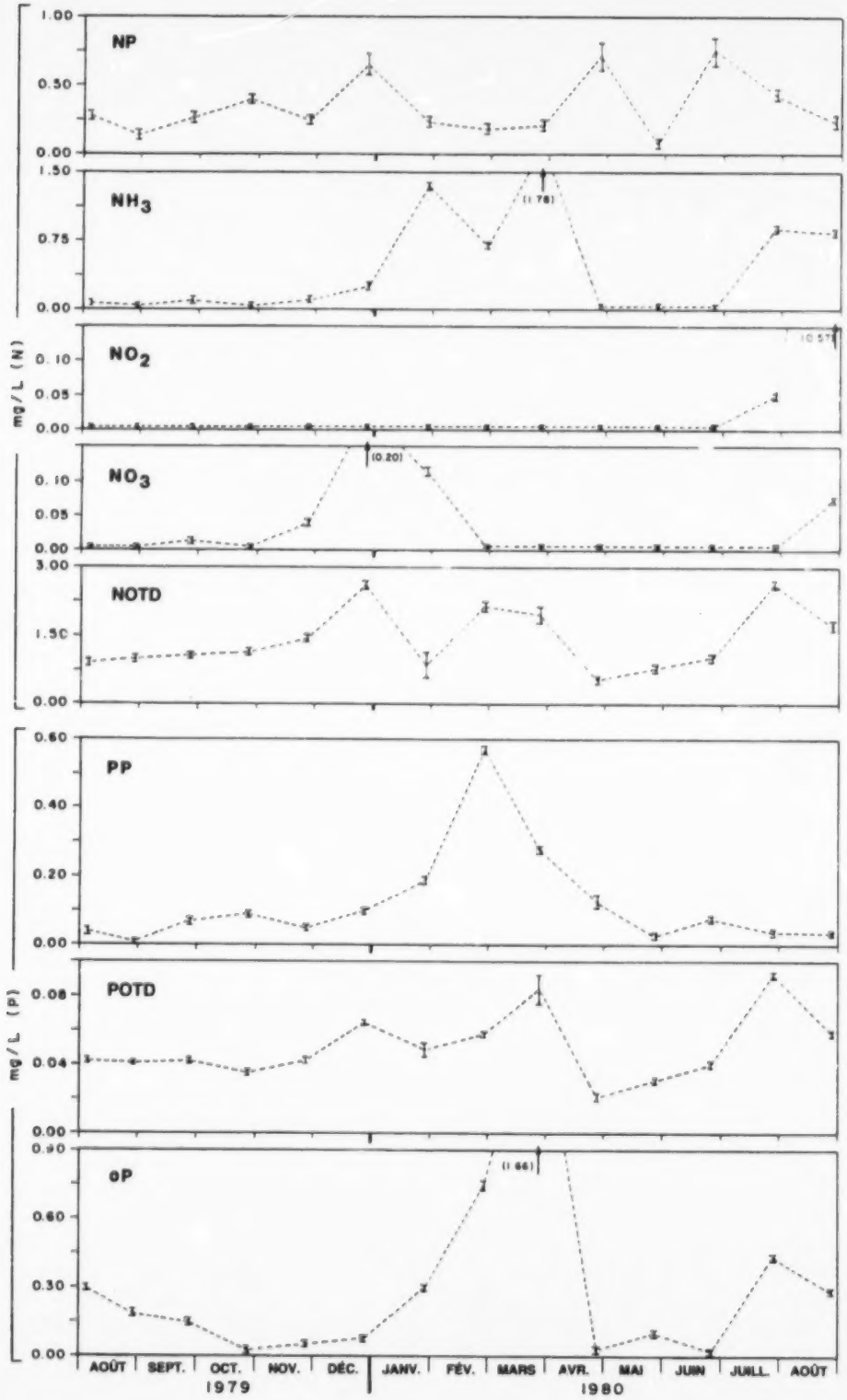

Figure 3. Variation des échantillons multiples par rapport à la variation pour la période visée par l'étude. Le niveau de confiance relatif à la moyenne est calculé à partir de $\left(\overline{X} \pm \frac{(s)\ (t)}{\sqrt{n-1}}\right)$ où $\overline{X}$ = moyenne des échantillons, s = écart type, t = valeur de Student à 0.05, et n = 12.

Tableau 1. Précision des échantillons multiples comparativement à la précision analytique

	Formes d'azote					Formes de phosphore		
	$N\text{-}NH_3$	$N\text{-}NO_2$	$N\text{-}NO_3$	N-NTD	N-NP	P-oP	P-PTD	P-PP
Précision analytique	2	20	6	2	8	A.D.	A.D.	8
Date de prélèvement								
79-08-02	55.3	88.9	172.2	12.8	36.2	1.4	2.0	47.4
79-06-21	37.6	37.0	75.0	12.6	79.0	2.0	2.0	31.5
79-09-27	28.6	45.5	32.1	6.7	47.3	3.8	3.2	54.7
79-10-29	63.3	39.0	130.2	5.3	14.3	18.7	6.7	11.4
79-11-28	16.4	<0.1	16.2	12.1	27.0	4.4	2.1	20.7
79-12-19	10.5	12.3	3.2	5.3	33.6	4.5	6.6	20.4
80-01-29	3.7	12.3	10.1	40.8	31.9	2.7	2.8	3.2
80-02-26	2.3	<0.1	180.9	8.3	36.9	4.7	5.4	5.5
80-03-25	2.3	<0.1	121.7	14.3	53.7	2.0	1.5	7.7
80-04-29	65.3	31.6	131.8	10.6	38.9	8.8	5.3	41.3
80-05-22	35.8	<0.1	126.3	20.0	36.7	22.0	16.4	29.6
80-06-17	87.0	<0.1	180.0	18.9	46.3	15.6	7.2	40.7
80-07-30	5.5	13.9	154.3	5.0	20.9	2.7	1.9	26.6
80-08-13	4.7	8.6	30.3	10.2	50.7	1.9	1.9	13.9

Note : La précision des échantillons multiples est calculée en multipliant par deux le coefficient de variation, en pourcentage $\left(\frac{s}{\bar{x}} \times 200\right)$; n = 12.

La précision analytique est déterminée à partir de six sous-échantillons d'un échantillon homogène d'eau provenant du Bouclier canadien.

A.D. = aucune donnée.

étudiée, et, en général, elle était plus grande pour les formes d'azote que pour les formes de phosphore.

Données chronologiques pour d'autres années sèches

Les débits moyens annuels de la rivière Souris varient considérablement (annexe A). La période des années 60 a été assez sèche; dans les années 70, les précipitations ont été relativement fortes, à l'exception de 1973, de 1977 et de 1978, tandis que 1980 et 1981 ont été des années sèches. Aux fins du présent document, on entend par année sèche une année où le débit moyen annuel est inférieur à 4.0 m^3/s.

Des données statistiques sommaires sur les nutriants pendant diverses périodes de débit des années sèches et de la période étudiée sont présentées dans le tableau 2. Afin de pouvoir comparer les données statistiques saisonnières et de minimiser les variations des nutriants dues au débit, les périodes indiquées dans le tableau 2 ont été déterminées d'après les hydrogrammes annuels. La «période de crue du printemps» a été définie de façon empirique comme la période correspondant à la partie de l'hydrogramme comprise entre le début et la fin du débit de pointe. Vient ensuite la «période de faible débit de l'eau libre», qui se termine avec la formation d'une couche de glace. La troisième période, c'est-à-dire la «période de faible débit de l'eau recouverte de glace», continue jusqu'au début du débit de pointe au printemps, indiqué par l'hydrogramme.

Les données du tableau 2 montrent qu'en général les concentrations d'azote total et de phosphore total sont à leur maximum au cours de la période de faible débit de l'eau recouverte de glace, et que les concentrations d'azote des nitrates et des nitrites sont le plus élevées durant la période de faible débit de l'eau libre. Ces données révèlent aussi qu'à l'exception de l'azote total et de l'azote des nitrates et des nitrites durant la période de crue du printemps, les concentrations moyennes durant les années sèches étaient comprises dans l'intervalle de variation observé au cours de la période étudiée. Dans le cas de l'azote total, la concentration moyenne était légèrement supérieure à la concentration maximale pour la période étudiée, mais en ce qui concerne l'azote des nitrates et des nitrites, elle était de beaucoup supérieure à la concentration maximale de 0.01 mg/L constatée durant la période étudiée. Par contre, la concentration moyenne de 0.08 mg/L pour les années sèches a été gonflée par une valeur anormalement élevée obtenue en 1978, car, cette année-là, le ruissellement des eaux de fonte a été plus élevé que lors des autres années dont il est question dans le présent document.

Tableau 2. Données statistiques sommaires sur les nutriants pendant les diverses périodes de débit

Paramètres et périodes de débit	Période visée par l'étude					Années sèches*				
	Moyenne	Écart type	Min.	Max.	Nbre	Moyenne	Écart type	Min.	Max.	Nbre
N-NT (mg/L)										
Période de crue du printemps	1.19	0.17	0.94	1.34	4	1.40	0.35	0.83	1.99	7
Période de faible débit de l'eau libre	2.48	1.21	1.45	4.02	5	2.57	1.54	0.74	8.11	25
Période de faible débit de l'eau recouverte de glace	3.04	0.87	1.84	4.02	5	2.44	1.01	1.27	5.83	21
$N\text{-}NO_3$ et $N\text{-}NO_2$ (mg/L)										
Période de crue du printemps	0.01	<0.01	<0.01	0.01	4	0.08	0.18	<0.01	0.50	7
Période de faible débit de l'eau libre	0.15	0.28	<0.01	0.64	5	0.22	0.41	<0.01	1.80	26
Période de faible débit de l'eau recouverte de glace	0.08	0.09	<0.01	0.21	5	0.09	0.10	<0.01	0.41	21
P-PT (mg/L)										
Période de crue du printemps	0.25	0.09	0.17	0.38	4	0.23	0.12	0.10	0.47	7
Période de faible débit de l'eau libre	0.31	0.18	0.14	0.57	5	0.34	0.24	0.05	1.15	31
Période de faible débit de l'eau recouverte de glace	0.87	0.80	0.16	2.02	5	0.43	0.44	0.09	1.90	20

* 1973, 1977, 1978, 1980 et 1981.

Tableau 3. Concentrations moyennes des formes d'azote et de phosphore pendant la période visée par l'étude (mg/L)

Date de prélèvement	Formes d'azote							Formes de phosphore				
	$N\text{-}NH_3$	$N\text{-}NO_2$	$N\text{-}NO_3$	N-NOTD	N-NTD	N-NP	N-NT	P-oP	P-POTD	P-PTD	P-PP	P-PT
79-08-02	0.06 (5)	<0.01 (<1)	<0.01 (<1)	0.99 (74)	1.06 (79)	0.28 (21)	1.34	0.30 (79)	0.04 (11)	0.34 (90)	0.04 (11)	0.38
79-08-21	0.04 (3)	<0.01 (<1)	<0.01 (<1)	1.04 (85)	1.09 (89)	0.13 (11)	1.22	0.20 (77)	0.04 (15)	0.24 (92)	0.02 (8)	0.26
79-09-27	0.10 (7)	<0.01 (<1)	0.02 (1)	1.07 (74)	1.19 (82)	0.26 (18)	1.45	0.16 (57)	0.05 (18)	0.21 (75)	0.07 (25)	0.28
79-10-29	0.03 (2)	<0.01 (<1)	0.01 (<1)	1.13 (72)	1.17 (75)	0.40 (26)	1.57	0.03 (20)	0.03 (20)	0.06 (40)	0.09 (60)	0.15
79-11-28	0.09 (5)	<0.01 (<1)	0.04 (2)	1.44 (78)	1.58 (86)	0.26 (14)	1.84	0.06 (38)	0.05 (31)	0.11 (69)	0.05 (31)	0.16
79-12-19	0.24 (7)	0.01 (<1)	0.20 (5)	2.61 (70)	3.06 (83)	0.65 (18)	3.71	0.08 (33)	0.06 (25)	0.14 (58)	0.10 (42)	0.24
80-01-29	1.34 (52)	0.01 (<1)	0.12 (5)	0.87 (34)	2.34 (90)	0.26 (10)	2.60	0.30 (56)	0.05 (9)	0.35 (65)	0.19 (35)	0.54
80-02-26	0.72 (24)	<0.01 (<1)	<0.01 (<1)	2.14 (70)	2.86 (94)	0.20 (7)	3.06	0.74 (54)	0.06 (4)	0.80 (58)	0.57 (42)	1.37
80-03-25	1.78 (44)	<0.01 (<1)	<0.01 (<1)	2.02 (50)	3.80 (95)	0.22 (6)	4.02	1.66 (82)	0.08 (4)	1.74 (86)	0.28 (14)	2.02
80-04-29	0.02 (2)	<0.01 (<1)	<0.01 (<1)	0.51 (40)	0.54 (43)	0.73 (58)	1.27	0.03 (17)	0.02 (11)	0.05 (28)	0.13 (72)	0.18
80-05-22	0.06 (6)	<0.01 (<1)	<0.01 (<1)	0.79 (83)	0.85 (90)	0.10 (11)	0.95	0.11 (69)	0.03 (19)	0.14 (88)	0.02 (13)	0.16
80-06-17	0.04 (2)	<0.01 (<1)	<0.01 (<1)	1.01 (56)	1.05 (58)	0.75 (42)	1.80	0.02 (14)	0.04 (29)	0.06 (43)	0.08 (57)	0.14
80-07-30	0.92 (23)	0.05 (1)	0.01 (<1)	2.61 (65)	3.59 (89)	0.43 (11)	4.02	0.43 (75)	0.10 (18)	0.53 (93)	0.04 (7)	0.57
80-08-13	0.86 (24)	0.57 (16)	0.08 (2)	1.77 (50)	3.28 (92)	0.27 (8)	3.55	0.29 (74)	0.06 (15)	0.35 (90)	0.04 (10)	0.39
Moy. d'étude	0.45 (20)	0.05 (2)	0.04 (2)	1.43 (62)	1.96 (85)	0.35 (15)	2.31	0.32 (65)	0.05 (10)	0.37 (76)	0.12 (25)	0.49

Note : Le pourcentage de la concentration totale est indiqué entre parenthèses.

L'élimination de cette valeur (0.5 mg/L) a permis d'obtenir une concentration moyenne de 0.01 mg/L, identique à la concentration trouvée pour la période étudiée. Par conséquent, même dans le cas de l'azote des nitrates et des nitrites, la concentration était probablement comprise dans l'intervalle de variation pour la période étudiée.

La figure 4 montre, pour chaque année, les diverses périodes de débit. Par comparaison avec la période étudiée et d'autres années sèches, la crue du printemps de 1978 a été beaucoup plus élevée, et en 1977, la concentration d'azote total au cours de la période de faible débit d'eau libre a été plus élevée que pendant les autres périodes. Les données montrent aussi que la concentration de phosphore total dans l'eau recouverte de glace a été la plus élevée pendant la période visée par l'étude. Ces valeurs élevées font l'objet d'une discussion dans la section «Concentration des nutriants au cours de la période étudiée et durant d'autres années sèches».

Formes d'azote et de phosphore

La concentration moyenne des formes d'azote et de phosphore ainsi que le pourcentage de la concentration totale de N et de P figurent au tableau 3. Au cours de la période visée par l'étude, l'azote organique total dissous était la forme prédominante d'azote, équivalant à 62 % de l'azote total. De 0.51 mg/L en avril, sa concentration a monté jusqu'à 2.61 mg/L en juillet et décembre. Venait ensuite l'azote ammoniacal, dont la concentration dans la rivière Souris était de 0.02 mg/L en avril, et de 1.78 mg/L en mars. L'azote des nitrates était présent en très faible quantité. Sa concentration pouvait être inférieure à 0.01 mg/L et aller jusqu'à 0.20 mg/L; la moyenne était de 0.04 mg/L. Quant à l'azote des nitrites, sa concentration était inférieure à 0.01 mg/L ou allait jusqu'à 0.57 mg/L. L'azote particulaire constituait 15 % de l'azote total, et il était à son maximum en avril et en juin.

Le phosphore des orthophosphates était la forme prédominante de phosphore dans la rivière Souris, équivalant à 65 % du phosphore total. Le phosphore organique total dissous est demeuré presque constant, sa concentration variant entre 0.02 mg/L et 0.10 mg/L. Le phosphore des polyphosphates a été dosé dans trois séries d'échantillons, et sa concentration moyenne était inférieure à 0.004 mg/L, ce qui indique qu'il était présent en très faible quantité dans la rivière Souris. La concentration de phosphore particulaire était de 0.57 mg/L en février et a baissé jusqu'à 0.02 mg/L en mai; la moyenne pour la période étudiée était de 0.12 mg/L.

Les valeurs des paramètres du lieu d'échantillonnage lorsque les échantillons multiples ont été prélevés sont données dans le tableau 4. Elles ont toutes considérablement varié au cours de la période étudiée. Pendant l'hiver, la température de l'eau était de 0° C, le pH, relativement faible, la conductivité, très élevée, et la teneur en oxygène dissous, très faible.

Tableau 4. Mesures effectuées sur place lors du prélèvement des échantillons multiples

Date de prélèvement	Température de l'eau (° C)	pH	Conductivité (µmhos)	Oxygène dissous (mg/L)
79-08-02	21.5	8.7	800	8.3
79-08-21	21.0	8.7	800	8.1
79-09-27	13.5	8.2	900	8.6
79-10-29	5.0	8.1	990	12.3
79-11-28	0.0	7.9	1380	14.3
79-12-19	0.0	7.6	2600	7.2
80-01-29	0.0	7.4	3000	7.2
80-02-26	0.0	7.3	2900	0.5
80-03-25	0.0	7.2	3900	0.0
80-04-29	15.0	7.7	550	9.6
80-05-22	18.5	8.1	800	8.0
80-06-17	19.0	8.6	900	9.6
80-07-30	18.5	8.1	1100	2.3
80-08-13	18.0	7.6	1000	3.3

DISCUSSION

Échantillon unique et homogénéité de la section transversale

Comme il a été mentionné dans la section «Échantillons multiples provenant de la section transversale de la rivière», la variation des échantillons multiples dépend des variations de l'analyse et de l'échantillonnage, des changements qui se produisent dans les bouteilles contenant les échantillons et de l'hétérogénéité de la section transversale de la rivière. On a aussi observé que la variation des échantillons multiples n'était pas uniforme pendant la durée de la période visée par l'étude et qu'en général la variation analytique était faible par rapport à la variation des échantillons multiples.

Une fois la variation analytique soustraite de la variation des échantillons, cette dernière représente la variation de l'échantillonnage, les changements se produisant dans les bouteilles contenant les échantillons, et l'hétérogénéité de la section transversale. Au cours de l'étude spéciale, comme les mêmes méthodes ont été employées pour prélever et préserver tous les échantillons, la variation de l'échantillonnage a été faible. Cependant, comme l'ont signalé

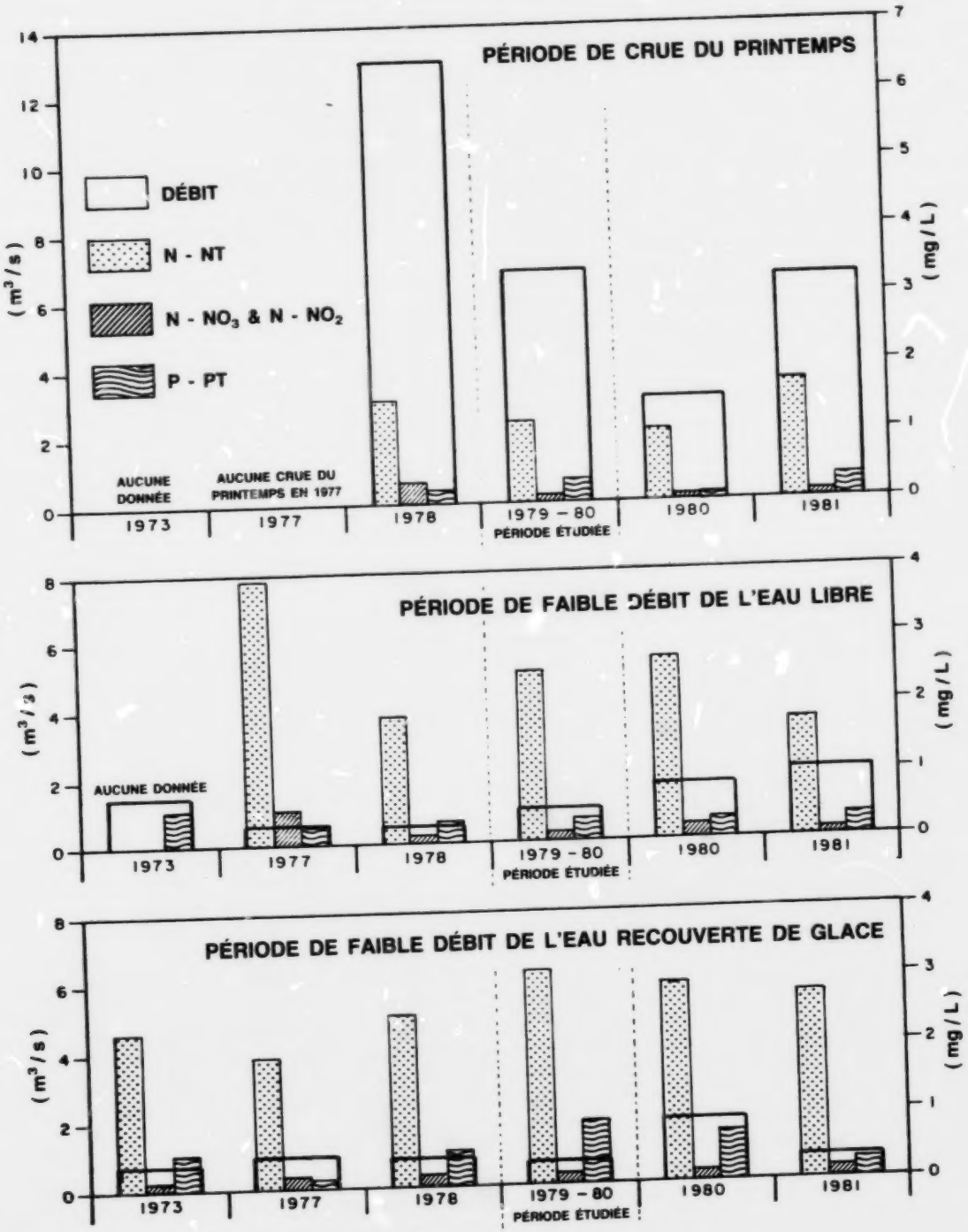

Figure 4. Débit moyen des journées d'échantillonnage et concentration moyenne des nutriants pendant les années sèches et pendant la période visée par l'étude, durant les diverses périodes de débit. La concentration moyenne est basée sur deux à sept échantillons.

divers auteurs (Klingaman et Nelson, 1976; Whitfield et McKinley, 1979), les formes d'azote et de phosphore peuvent se transformer (changer) dans les bouteilles avant que les analyses soient effectuées. Si le taux de changement n'a pas été le même dans n'importe laquelle des 12 bouteilles contenant les échantillons recueillis au cours de chaque voyage, cela peut expliquer en partie ou en totalité les variations des échantillons qui ont été observées. Toutefois, ce n'est probablement pas un facteur important, parce que les échantillons ont été traités de la même façon et que leur analyse ou la séparation des particules par filtration ont été effectuées dans les 24 h suivant le prélèvement.

Dans l'ensemble, les variations dans le cas de l'azote total dissous ont été plus grandes que pour le phosphore total dissous, et il en a été de même pour l'azote particulaire comparativement au phosphore particulaire. Les plus faibles variations ont été constatées dans le cas du phosphore des orthophosphates et du phosphore total dissous. Une étude précédente portant sur la rivière Rouge (Chacko et coll., 1981) a permis d'observer les mêmes tendances. Ces résultats montrent donc que l'échantillonnage multiple est plus important pour les formes d'azote que pour les formes de phosphore. Toutefois, d'autres recherches sont nécessaires pour déterminer dans quelle mesure les variations constatées ont été causées par l'hétérogénéité de la section transversale de la rivière plutôt que par des taux différents de changement dans les bouteilles en dedans de 24 h.

La comparaison de la variation des échantillons multiples avec la variation observée au cours de la période visée par l'étude (figure 3) semble indiquer que pour toutes les formes assimilables, la variation des échantillons était minime par rapport à la variation d'un mois à l'autre. Les causes des variations mensuelles et d'un mois à l'autre sont discutées dans la section «Formes et rapports des nutriants». Par conséquent, même s'il faut avoir recours à l'échantillonnage multiple pour caractériser une section transversale dans une rivière, cela n'est pas essentiel pour déterminer les variations saisonnières ou d'un mois à l'autre.

Concentration des nutriants au cours de la période étudiée et durant d'autres années sèches

Les données statistiques sommaires concernant la période étudiée et d'autres années sèches révèlent que dans les deux cas, pendant une même période de débit, la variation des concentrations de nutriants a été importante (tableau 2), ce qui montre qu'un échantillonnage dans le temps est nécessaire pour caractériser une période de débit. Comme il est mentionné plus loin dans la section «Formes et rapports des nutriants», la concentration des nutriants dans la rivière Souris varie en fonction de certains facteurs : processus biologiques et chimiques qui s'ajoutent les uns aux autres, et phénomènes physiques comme les précipitations, le ruissellement et les déversements d'eau provenant du réservoir J. Clark Salyer. Les précipitations et le ruissellement moins abondants ont eu un effet marqué sur les concentrations d'azote des nitrates et des nitrites, qui ont diminué. Les données chronologiques fichées montrent aussi que ces concentrations sont en général plus élevées lorsque les précipitations et le ruissellement sont abondants. Dans l'ensemble, au cours de la période étudiée et pendant d'autres années sèches, l'intervalle de variation de l'azote des nitrates et des nitrites a été plus grand que dans le cas de l'azote total et du phosphore total. Les variations de l'azote total ont été à leur maximum pendant la période de faible débit de l'eau libre, et pour ce qui est du phosphore total, elles ont été les plus grandes pendant la période de faible débit de l'eau recouverte de glace.

L'examen des diverses périodes de débit pour les années sèches et la période étudiée révèle aussi que les concentrations d'azote total et de phosphore total étaient à leur maximum pendant la période de faible débit de l'eau recouverte de glace et qu'il en était de même pour les concentrations d'azote des nitrates et des nitrites durant la période de faible débit de l'eau libre. Les fortes concentrations d'azote total pendant la période de faible débit de l'eau libre en 1977 et de phosphore total pendant la période de faible débit de l'eau recouverte de glace au cours de l'année visée par l'étude constituent des exceptions. On ne sait pas pourquoi la concentration d'azote total était élevée. Une explication possible de la forte concentration de phosphore total est proposée dans la section «Phosphore particulaire».

En conséquence, la comparaison des données de la période étudiée et de celles des autres années sèches indique que, mis à part quelques exceptions mineures (voir la section «Données chronologiques pour d'autres années sèches»), les concentrations d'azote total, d'azote des nitrates et des nitrites et de phosphore total étaient sensiblement les mêmes. Les valeurs concordaient le plus pour le phosphore total, et le moins, dans le cas de l'azote des nitrates et des nitrites.

Formes et rapports des nutriants

Azote organique total dissous

Les augmentations considérables d'azote organique total dissous observées pendant la période hivernale étaient probablement dues à diverses sources, comme la décomposition de la flore et de la faune, les effets de concentration

causés par le froid rigoureux et qui se sont traduits par une augmentation de la conductivité (tableau 4), et l'apport des eaux souterraines. On croit que l'augmentation constatée en juillet et en août était due à la libération de l'eau, riche en nutriants, du réservoir J. Clark Salyer. En 1980, comme les précipitations et le ruissellement étaient très faibles, il a été nécessaire d'abaisser le niveau d'eau du réservoir pour maintenir un débit de 0.57 m^3/s à la frontière du Dakota Nord et du Manitoba. Il a fallu pour cela retirer de l'eau près du fond du réservoir (communication personnelle de T. Stewart, 1984, United States Fish and Wildlife Service, Bismark, N.D.).

Azote ammoniacal (total)

Dans le cas de l'azote ammoniacal, les tendances ont été les mêmes que pour l'azote organique total dissous (tableau 3). Les valeurs ont été élevées en juillet et en août, probablement pour la même raison qui a causé l'augmentation des concentrations d'azote organique total dissous. En janvier, l'azote ammoniacal représentait 52 % de l'azote total, et les causes de cette augmentation en période hivernale ont été analysées dans d'autres publications (Johannes, 1968; Keeney, 1973).

Pendant l'hiver, comme la température et le pH étaient bas (en février, 0° C et 7.3, respectivement), presque tout l'azote ammoniacal était ionisé (NH^+_4), mais en juillet, à la suite d'une hausse de la température et du pH (18.5° C et 8.1, respectivement), la concentration d'azote ammoniacal non ionisé (NH_3), calculée d'après la méthode d'Emerson et coll. (1975), était de 0.04 mg/L, soit deux fois la limite de 0.02 mg/L proposée par l'United States Environmental Studies Board (1973) pour la protection des organismes aquatiques d'eau douce. Étant donné l'importance de la variation de la concentration et de l'ionisation de cette forme d'azote, il est évident que le prélèvement de quelques échantillons par année n'est pas suffisant pour déterminer la concentration de l'azote ammoniacal dans la rivière Souris.

Azote des nitrates

D'après McCarty et coll. (1970), la teneur en azote total des eaux de drainage agricole varie de 1 mg/L à plus de 100 mg/L, et les nitrates sont la forme prédominante. Dans l'étude portant sur la rivière Rouge, on a observé que jusqu'à 60 % de l'azote total, lorsque les eaux de fonte des neiges étaient abondantes, provenait des nitrates. Dans la rivière Souris, pendant la même période, l'azote des nitrates représentait moins de 1 % de l'azote total. La raison semble en être le faible volume des eaux de fonte et le lessivage en surface limité durant les années sèches. Les faibles concentrations observées pendant l'été étaient probablement dues à l'assimilation rapide de l'azote par les algues. On croit que la concentration maximale constatée au début de l'hiver (en décembre et en janvier), alors que la teneur en oxygène dissous était supérieure à 7 mg/L (tableau 4), avait pour cause une réduction de l'assimilation biologique. Toutefois, en février et en mars, la quantité d'oxygène dissous s'épuisait (les teneurs étaient de 0.5 mg/L et de 0.0 mg/L, respectivement), et les concentrations d'azote des nitrates étaient à nouveau inférieures à la limite de détection, indiquant ainsi une dénitrification en milieu anaérobie.

Azote des nitrites

La teneur en nitrites était très faible, à l'exception des valeurs anormalement élevées observées en juillet et en août 1980 (tableau 3), qui sont attribuées à l'eau libérée du réservoir J. Clark Salyer, comme il a été mentionné plus haut.

Azote particulaire

En dépit du faible volume des eaux de fonte des neiges, la concentration d'azote particulaire a augmenté pendant la crue du printemps et aussi en juin. Au printemps, l'augmentation est apparemment due à la plus grande quantité de matières en suspension observée à cette période, et en juin, à la teneur en matières organiques, plus forte durant l'été.

Phosphore des orthophosphates

Par contraste avec les très faibles concentrations de nitrates observées dans la rivière Souris, la concentration du phosphore des orthophosphates est demeurée élevée, équivalant en moyenne à 65 % du phosphore total pour la période visée par l'étude. En général, comme dans le cas de l'azote organique total dissous et de l'azote ammoniacal, les concentrations étaient élevées en hiver de même qu'en juillet et en août. L'augmentation constatée en février et en mars a été attribuée, au moins en partie, à la minéralisation microbienne des complexes du fer et du manganèse dans la rivière Souris. La formation d'orthophosphates en milieu anaérobie à partir des complexes du fer et du manganèse est discutée dans une autre publication (Wetzel, 1975). Les concentrations de fer et de manganèse en février et en mars étaient anormalement élevées, et les teneurs moyennes étaient respectivement de 1.1 mg/L et de 3.3 mg/L. Si l'on reconnaît que la concentration critique de phosphore des orthophosphates pour la croissance des algues est de 0.01 mg/L (Sawyer et McCarty, 1967), cette concentration n'a jamais été un facteur limitatif dans le cas de la rivière Souris.

Phosphore organique total dissous

La concentration moyenne de phosphore organique total dissous équivalait à 10 % de la concentration totale de phosphore, comparativement à 62 % pour l'azote organique total dissous. Bien que le pourcentage se soit élevé jusqu'à 31 % au cours de la période visée par l'étude (un pourcentage semblable, soit 30 %, a été mentionné par Englebrecht et Morgan en 1959), dans l'ensemble, la concentration de phosphore organique total dissous était faible. Des résultats semblables (moins de 10 %) ont aussi été obtenus lors de l'étude portant sur la rivière Rouge.

Phosphore particulaire

Contrairement à d'autres observations qui ont déjà été faites (Cahill, 1977; Ongley, 1978; Chacko et coll., 1981), les concentrations de phosphore particulaire ont atteint un maximum durant l'hiver, lorsque l'eau était recouverte de glace, et non pas pendant la crue du printemps. La concentration anormalement élevée observée en février a apparemment coïncidé avec la libération d'un plus grand volume d'eau provenant du réservoir J. Clark Salyer. Une vanne de réglage du réservoir, qui était gelée, a été forcée, ce qui a eu pour effet de libérer une plus grande quantité d'eau et de sédiments en suspension (communication personnelle de T. Stewart, United States Fish and Wildlife Service, Bismark, N.D.).

Dans l'ensemble, le pourcentage de phosphore particulaire était faible, soit seulement 25 % du phosphore total pour la période visée par l'étude. Si l'on ne tient pas compte de la valeur obtenue en février, ce pourcentage est ramené à 18 %, ce qui est beaucoup moins que le pourcentage de 54 % calculé lors de l'étude de la rivière Rouge, et encore beaucoup plus faible que le pourcentage mentionné par Cahill (1977). On croit que cette faible concentration de phosphore particulaire généralement observée est due au volume peu élevé des eaux de fonte des neiges, dont il a été question précédemment.

Rapports phosphore/azote

Il a été proposé que le phosphore soit considéré comme un facteur limitatif de la croissance des algues lorsque le rapport atomique entre l'azote inorganique (l'azote ammoniacal et l'azote des nitrates et des nitrites) et le phosphore des orthophosphates est supérieur à 10 (Chiaudani et Vighi, 1974). Dans la rivière Souris, ce rapport a généralement été inférieur à 10 et, dans deux cas, inférieur à 1 (tableau 5). La très faible valeur de ce rapport calculé pour la période visée par l'étude (1979-1980) est due à la faible concentration de nitrates, résultant apparemment du ruissellement limité en surface. Les rapports les plus élevés ont été constatés au début de la période hivernale ainsi qu'au mois d'août 1980; dans ce dernier cas, la valeur exceptionnelle du rapport a été attribuée à la libération de l'eau du réservoir. Conformément à l'hypothèse avancée plus haut, la décomposition de la matière organique par les bactéries hétérotrophes à une période où l'assimilation par le phytoplancton était faible a probablement eu pour résultat l'augmentation de la concentration d'azote inorganique. On croit que les faibles rapports observés durant l'été sont dus à l'assimilation biologique rapide pen-

Tableau 5. Concentrations et rapports atomiques du N inorganique et du P des orthophosphates; concentrations et rapports atomiques du P particulaire et du N particulaire

Date de prélèvement	N inorganique (mg/L)	P des orthophosphates (mg/L)	N : P atomique	P particulaire (mg/L)	N particulaire (mg/L)	P : N atomique
79-08-02	0.07	0.30	1:2	0.04	0.28	1:17
79-08-21	0.05	0.20	1:2	0.02	0.13	1:16
79-09-27	0.12	0.16	2:1	0.07	0.26	1:9
79-10-29	0.04	0.03	3:1	0.09	0.40	1:11
79-11-28	0.14	0.06	6:1	0.05	0.26	1:13
79-12-19	0.45	0.08	14:1	0.10	0.65	1:16
80-01-29	1.47	0.30	12:1	0.19	0.26	1:3
80-02-26	0.73	0.74	2:1	0.57	0.20	1:1
80-03-25	1.79	1.66	3:1	0.28	0.22	1:2
80-04-29	0.03	0.03	2:1	0.13	0.73	1:14
80-05-22	0.06	0.11	1:1	0.02	0.10	1:12
80-06-17	0.04	0.02	5:1	0.08	0.75	1:23
80-07-30	0.97	0.43	5:1	0.04	0.43	1:27
80-08-13	1.50	0.29	13:1	0.04	0.27	1:17

dant cette période. Allan et Roy (1980) ont obtenu de semblables résultats (rapports élevés en hiver et faibles en été) dans leur étude portant sur la rivière Qu'Appelle. Les rapports entre l'azote inorganique et le phosphore des orthophosphates (tableau 5) semblent indiquer que, dans l'ensemble, la rivière Souris est un cours d'eau limité en azote inorganique plutôt qu'en phosphore des orthophosphates. Il est donc raisonnable de penser que l'augmentation prévue de la concentration d'azote inorganique résultant de la réalisation du projet de dérivation Garrison pourrait avoir pour effet une productivité biologique accrue dans la rivière Souris. La décomposition de cette biomasse réduirait encore la teneur en oxygène dissous durant la période hivernale et prolongerait ainsi la durée des conditions anaérobies.

Si l'on accepte comme base de comparaison la valeur de 1:16 pour le rapport atomique entre le phosphore et l'azote dans les cellules végétales (celles des algues et des bactéries), comme le mentionnent McCarty et coll. (1970), la majorité des rapports entre le phosphore particulaire et l'azote particulaire pendant la période estivale semblent indiquer une origine végétale. Les rapports très différents en période hivernale, résultant surtout de l'augmentation de la concentration de phosphore particulaire (voir la section «Phosphore particulaire»), indiquent une origine non végétale.

CONCLUSIONS

L'échantillonnage multiple a été plus important pour les formes d'azote que pour les formes de phosphore. Toutefois, étant donné que, dans les deux cas, les variations observées dans la section transversale étaient minimes en comparaison avec les variations d'un mois à l'autre, l'échantillonnage multiple n'a pas été important pour déterminer les variations saisonnières.

Dans une même période de débit, la concentration des nutriants a varié de façon considérable, ce qui montre la nécessité d'un échantillonnage dans le temps pour caractériser une période de débit. Pour une même période, les plus fortes variations ont été observées dans le cas de l'azote des nitrates et des nitrites, puis pour l'azote total et le phosphore total. La concentration de ces nutriants en 1979-1980 a été la même que durant d'autres années sèches.

Les déversements d'eau provenant du réservoir J. Clark Salyer semblent avoir eu un effet sur les formes d'azote et de phosphore de la rivière Souris près de Coulter. Les formes prédominantes d'azote ont été l'azote organique total dissous (62 %), l'azote ammoniacal (20 %) et l'azote particulaire (15 %). Au cours de la période estivale, la concentration d'azote ammoniacal non ionisé a été bien supérieure à la limite de 0.02 mg/L proposée pour la protection des organismes aquatiques d'eau douce. Les formes prédominantes de phosphore ont été le phosphore des orthophosphates (65 %), le phosphore particulaire (25 %) et le phosphore organique total dissous (10 %). Les concentrations de phosphore des orthophosphates ont toujours été bien supérieures à la limite critique de 0.01 mg/L proposée en ce qui concerne la croissance des algues. Dans l'ensemble, les données indiquent que la rivière Souris est un cours d'eau limité en azote inorganique plutôt qu'en phosphore des orthophosphates.

RECOMMANDATIONS

1. Pour déterminer la concentration des formes d'azote et de phosphore dans une section transversale de la rivière Souris, la méthode de l'échantillonnage multiple devrait être employée. (Il est plus important de l'utiliser pour les formes d'azote que pour les formes de phosphore.)

2. D'autres recherches devraient être effectuées en vue de savoir si la variation des échantillons multiples qui a été observée dépendait de l'hétérogénéité de la section transversale de la rivière ou du taux différent de transformation des formes assimilables dans les bouteilles contenant les échantillons.

3. Le prélèvement régulier d'échantillons en vue de la détermination des concentrations de nutriants devrait se faire plusieurs fois pendant chacune des périodes de débit. Pour établir de façon précise la fréquence de ces prélèvements, il faut étudier les données quotidiennes sur les nutriants.

4. Pendant l'été, lorsque le pH est supérieur à 8.5, un plus grand nombre de prélèvements devrait être effectué pour déterminer la concentration de l'azote ammoniacal.

5. Si la concentration d'azote inorganique dans la rivière Souris augmente à la suite de la mise à exécution du projet de dérivation Garrison, le débit devrait être augmenté durant l'hiver pour minimiser l'impact de la décomposition de la biomasse.

REMERCIEMENTS

Nous aimerions remercier K. Thomson de la Direction de la qualité des eaux pour l'aide qu'il nous a accordée et le vif intérêt qu'il a manifesté au cours de la présente étude.

Nous remercions aussi B. Chu qui nous a prêté une aide considérable dans la collecte des échantillons et les analyses effectuées sur le terrain. Nous sommes également reconnaissant au personnel de la Section des eaux et des sédiments à l'Institut des eaux douces (Pêches et Océans) pour avoir fait l'analyse des nutriants dans la limite de temps imposée, et à D. MacNeill qui était chargée de dactylographier le manuscrit.

RÉFÉRENCES

Allan, R.J., et M. Roy. 1980. Chimie des substances nutritives et chlorophylle *a* dans les eaux des lacs Pasqua, Echo, Mission, Katepwa, Crooked et Round du bassin de la rivière Qu'Appelle, Saskatchewan. Étude nº 112, Série Scientifique, Institut national de recherche sur les eaux, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Regina (Sask.).

Brunskill, G.J. 1974. Rates of supply of nitrogen and phosphorus to Lake Winnipeg, in relation to the Garrison Diversion. Manitoba Environmental Council, Study No. 2, Winnipeg (Man.).

Cahill, T. 1977. Transport of sediment, forms and sediment associations of nutrients (C, N, and P) pesticides and metals, (b) nutrients-P. Dans Proc. of a Workshop on the Fluvial Transport of Sediment-Associated Nutrients and Contaminants, published by the International Joint Commission, Windsor (Ont.), p. 163–80.

Chacko, V.T., B.C.S. Chu, et Wm. D. Gummer. 1981. Variations saisonnières des formes d'azote et de phosphore dans la rivière Rouge. Étude nº 128, Série Scientifique, Direction de la qualité des eaux, Région de l'Ouest et du Nord, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Regina (Sask.).

Chiaudani, G., et M. Vighi. 1974. The N:P ratio and tests with *Selenastrum* to predict eutrophication in lakes. Water Research 8(12):1063–69.

Direction de la qualité des eaux. 1979. Handbook for Collecting, Preserving and Shipping of Southern Water Samples. Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Regina (Sask.).

Emerson, K., R.G. Russo, R.E. Lund, et R.V. Thurston. 1975. Aqueous ammonia equilibrium calculation: effect of pH and temperature. J. Fish. Res. Board Can., 32:2379–83.

Englebrecht, R.S., et J.J. Morgan. 1959. Studies on the occurrence and degradation of condensed phosphate in surface water. Sewage Ind. Wastes, 31:458.

Environnement Canada. 1973. Instruction for Taking and Shipping Water Samples for Physical and Chemical Analysis. 2nd ed. Direction de la qualité des eaux, Direction générale des eaux intérieures, Ottawa (Ont.).

Environnement Canada. 1981. Données sur les eaux de surface—Manitoba, 1980. Direction des ressources en eau, Direction générale des eaux intérieures, Ottawa (Ont.).

Environnement Canada. 1983. Sommaire chronologique de l'écoulement—Manitoba, 1982. Direction des ressources en eau, Direction générale des eaux intérieures, Ottawa (Ont.).

Environnement Canada, 1986. *Manuel des méthodes analytiques*. Direction de la qualité des eaux, Direction générale des eaux intérieures, Ottawa (Ont.).

International Garrison Diversion Study Board. 1976a. Report to the International Joint Commission. Ottawa (Ont.).

International Garrison Diversion Study Board. 1976b. Report to the International Joint Commission. Appendix A. Ottawa (Ont.).

Johannes, R.E. 1968. Nutrient generation in lakes and oceans. Adv. Microbiol. Sea, 1:203–12.

Keeney, D.R. 1973. The nitrogen cycle in sediment-water systems. J. Environ. Qual., 2:15–29.

Klingaman, E.D., et D.W. Nelson. 1976. Evaluation of methods for preserving the levels of soluble inorganic phosphorus and nitrogen in unfiltered water samples. J. Environ. Qual., 5(1):42–46.

Manitoba Clean Environment Commission. 1980. Manitoba Report, Souris River, Principal Watershed Division. Winnipeg (Man.).

McCarty, P.L., et coll. 1970. Committee report. Chemistry of nitrogen and phosphorus in water. J. Am. Water Works Assoc., 62:127.

Ongley, E.D. 1978. Sediment-related phosphorus, trace metal and anion flux in two rural southeastern Ontario catchments. Programme de subventions à la recherche, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa (Ont.). Rapport provisoire non publié.

Sawyer, N.S., et P.L. McCarty. 1967. *Chemistry for Sanitary Engineers*. New York: McGraw-Hill Book Co.

Stainton, M.P., M.J. Capel, et F.A.J. Armstrong. 1974. The chemical analysis of fresh water. Service de la marine et des pêches, Environnement Canada, Winnipeg (Man.).

United States Environmental Protection Agency. 1971. Water Quality Investigation—Souris River Basin. Water Quality Region VII, Kansas City, Mo.

United States Environmental Studies Board. 1973. Water quality criteria 1972. EPA-R3-73-033. Committee on Water Quality Criteria, Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

Wetzel, R.G. 1975. *Limnology*. Philadelphia: W.B. Saunders Co.

Whitfield, P.H., et J.W. McKinley. 1979. Some factors affecting the determination of particulate carbon and nitrogen in natural water. Direction de la qualité des eaux, Environnement Canada, Vancouver (B.C.). Rapport non publié.

ANNEXE A

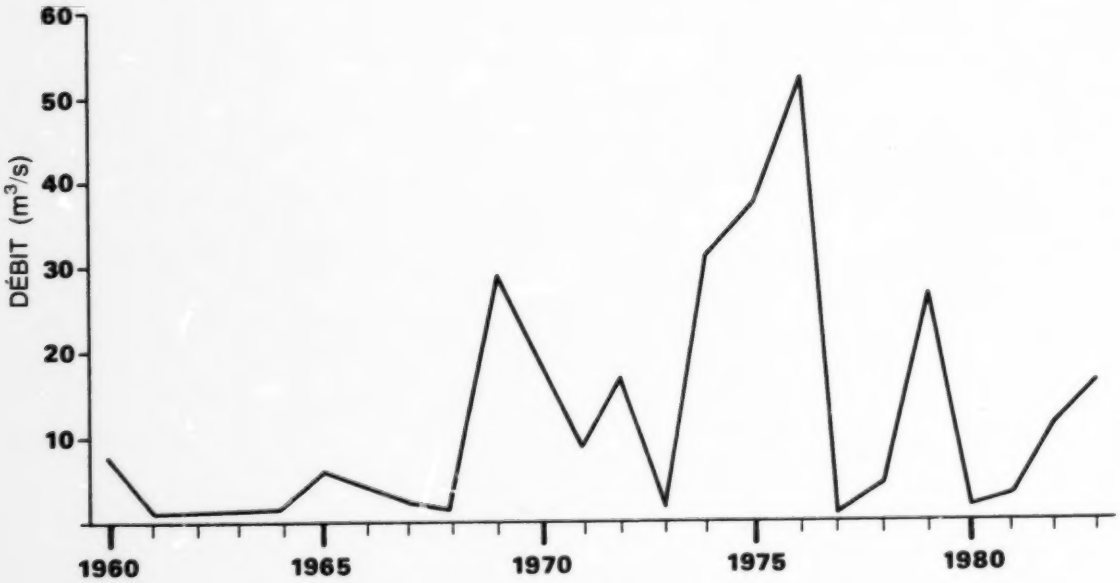

Figure A-1. Débits moyens annuels—rivière Souris près de Coulter (1960-1983).